

# **INFLUÊNCIA DA UMIDADE DE COMPACTAÇÃO NA ESCOLHA DA GEOMETRIA E INCLINAÇÃO DOS ESPALDARES DE UMA BARRAGEM DE TERRA HOMOGÊNEA**

Buriticá Garcia, Julián; *Centro Universitário de Brasília UniCEUB, Brasília - DF, Brasil, julianburitica@gmail.com*

Pacheco de Assis, André; *Universidade de Brasília UnB, Brasília - DF, Brasil, aassis@unb.br*

## **RESUMO**

Neste trabalho são apresentadas as análises de estabilidade dos taludes de montante e jusante de uma barragem homogênea com filtro vertical compactada com material fino na umidade ótima, umidade ótima + 2% e umidade ótima + 5%. São obtidos fatores de segurança para duas seções típicas hipotéticas de diferentes inclinações, nas etapas de final de construção, fase de enchimento, operação e rebaixamento rápido da barragem, para entender a influência do fator de segurança, na escolha da geometria e inclinação dos espaldares da barragem. Maciços compactados com umidade acima da ótima exigem uma maior declividade nos taludes de montante e jusante para garantir a estabilidade o que acarreta um aumento do material compactado e aumento dos custos. Os parâmetros utilizados nas simulações numéricas foram obtidos a partir de uma campanha experimental de ensaios de caracterização física, compactação, adensamento, permeabilidade, triaxiais saturados tipos CD e microscopia eletrônica de varredura apresentados por Buriticá (2013) para corpos de prova compactados nas umidades acima descritas. Em termos gerais as seções estudadas mostraram resultados satisfatórios na maioria das análises com exceção das análises de rebaixamento rápido que mostraram baixos fatores de segurança para geometrias com grandes inclinações, o que quer dizer que pode ser conveniente a execução desse tipo de barragens sempre e quando exista material suficiente no local para construir taludes com menor inclinação e se tomem os cuidados necessários na escolha do equipamento de compactação, aproveitamento da temporada seca, controle de zonas de empréstimo, selagem das áreas compactadas e monitoramento por meio de instrumentação geotécnica durante as fases de construção e operação.

## **ABSTRACT**

This work presents the slope stability analysis of a homogeneous earth dam with vertical filter compacted with silty clay soil at optimum moisture content, optimum moisture content + 2% and optimum moisture content + 5%. Factors of safety are determined for two hypothetical typical sections with different slopes. Four construction and / or loading conditions were examined in particular: After construction condition, the first filling of a reservoir, steady seepage condition (operation) and the rapid drawdown condition to understand the influence of the factor of safety in the geometry and slope choice of the upstream and downstream slopes dam. The homogeneous section built with compacted material above the optimum moisture content require to build slope with lows angles of inclination of the upstream and downstream slopes to ensure the stability, this activity leads to an increase in the compacted material and increased costs. Buriticá (2013) determined the geotechnical silty-clay typical Federal District soil properties used in the numerical simulations. Several tests were performed in compacted specimens with standard Proctor energy and different moisture content. Test like physical characterization, compaction, oedometric compression, permeability, triaxial compression CD and scanning electron microscopy (SEM). The analyzes showed appropriate and positive behaviors after construction condition, first filling of a reservoir, steady seepage condition (operation). On the other hand, the rapid drawdown condition showed low safety factors, which means it can be convenient, while there is sufficient material at the place to build slopes with low angles of inclination and take the necessary precautions with the choice of compaction equipment, harnessing of dry season, control of borrow area, sealing the compacted areas and geotechnical instrumentation during construction and operation of reservoir.

## **1 - INTRODUÇÃO**

Existem regiões chuvosas com elevadas precipitações anuais onde se torna difícil a construção de barragens de terra homogêneas compactados com equipamentos convencionais e o solo nas proximidades da umidade ótima. Nesses lugares onde a umidade do solo é maior do que a ótima, Costuma-se tratar o solo para reduzir o teor de água, mas esta prática geralmente causa atrasos e custos adicionais na construção. O controle da compactação nas barragens de terra torna-se crítico estes tipos de arranjos têm sido preteridos por outras alternativas, mesmo essas soluções sendo mais caras. Uma boa alternativa seria usar o material fino disponível no local para economizar, porém como esta tem uma umidade acima da ótima, teria que aceitar a baixa compactação obtida e as deformações geradas.

A compactação do material fino dos espaldares é muito importante na estabilidade dos taludes, porque as propriedades geotécnicas como percolação, compressibilidade e resistência dependem diretamente do teor

de umidade e o grau de compactação atingido. Os projetos de barragens de terra estão fortemente influenciados pela umidade do material de empréstimo, solos que são compactados no ramo úmido da curva de compactação mostram um comportamento de tensão deformação plástico no sentido que o módulo de deformabilidade é baixo e as curvas tensão deformação são suavizadas e podem gerar baixas resistências e elevadas poropressões durante a construção.

Por outro lado os solos compactados no ramo seco da curva de compactação mostram um comportamento tensão deformação mais rígido e elevado módulo de deformabilidade, têm altas resistências e baixas poropressões durante a construção, mas solos compactados muito abaixo da ótima podem sofrer trincamentos.

Esta pesquisa pretende aperfeiçoar o entendimento da influência da umidade de compactação na estabilidade dos taludes de montante e jusante de uma barragem nas diferentes etapas da construção e operação.

## 2 - MATERIAIS E MÉTODOS

Pro desenvolvimento desta pesquisa se utilizaram os parâmetros para um solo silte argiloso típico da região do Distrito Federal, Brasil, apresentados por Buriticá (2013) para realizar análises de estabilidade dos taludes das seções típicas hipotéticas de uma barragem de terra homogênea com espaldares compactados na umidade ótima, umidade ótima + 2% e umidade ótima + 5%.

### 2.1 - Parâmetros geotécnicos do solo utilizado

O solo utilizado foi coletado no campo experimental de fundações do programa de pós graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília. As amostras foram retiradas por meio da escavação de um poço de aproximadamente 1 m de diâmetro e 1,5 m de profundidade, as amostras eram deformadas.

No quadro 1 e quadro 2, se apresentam as propriedades geotécnicas pra ser utilizadas nas simulações numéricas de estabilidade de taludes.

Quadro 1- Caracterização física e classificação dos solos utilizados (Buriticá, 2013)

	<b>Amostra</b>	<b>Solo campo experimental</b>
<b>Com defloculante</b>	<b>Pedregulho (%)</b>	0
	<b>Areia (%)</b>	58,9
	<b>Silte (%)</b>	24,4
	<b>Argila (%)</b>	16,7
<b>Sem defloculante</b>	<b>Pedregulho (%)</b>	0
	<b>Areia (%)</b>	74,8
	<b>Silte (%)</b>	24
	<b>Argila (%)</b>	1,2
	<b>Peso específico natural - <math>\gamma</math> (kN/m<sup>3</sup>)</b>	17,55
	<b>Peso específico real dos grãos - <math>\gamma_s</math> (kN/m<sup>3</sup>)</b>	26,87
	<b>Densidade dos grãos - G</b>	2,74
	<b>Umidade natural- W<sub>nat</sub> (%)</b>	27
	<b>Limite de liquidez - W<sub>L</sub> (%)</b>	35,74
	<b>Limite de plasticidade - W<sub>p</sub> (%)</b>	23,2
	<b>Índice de plasticidade - IP (%)</b>	12,54
	<b>Classificação SUCS</b>	ML
	<b>Classificação MCT</b>	LA'-LG'

Quadro 2- Parâmetros geotécnicos utilizados nas simulações numéricas (Buriticá, 2013)

SOLO		PARÂMETROS							
		E(kPa)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\nu$	$\Phi$ (°)	c (kPa)	k (m/s)	Ko	Ru
Solo da Fundação		60000	18	0.35	28	30	1.00E-11	0.5	0.2
Espaldares de cascalho		60000	20	0.35	38	10	1.00E-04	0.5	0
Transição		100000	20	0.35	32	0	1.00E-03	0.5	0.05
Filtros e Drenos		100000	20	0.35	30	0	1.00E-03	0.5	0.05
Núcleo Argiloso		-	19.1	0.4	27	48	1.00E-09	0.55	0.25
Solo do aterro (homogênea)	w ótima	-	19.1	0.4	27	48	1.00E-09	0.55	0.25
Núcleo Argiloso		-	18.9	0.4	26	30	5.00E-09	0.56	0.3
Solo do aterro (homogênea)	w ótima +2%	-	18.9	0.4	26	30	5.00E-09	0.56	0.3
Núcleo Argiloso		-	18.5	0.4	14	50	1.00E-08	0.7	0.5
Solo do aterro (homogênea)	w ótima +5%	-	18.5	0.4	14	50	1.00E-08	0.7	0.5

## 2.2 - Simulações numéricas no software SLOPE/W do pacote GeoStudio

Utilizaram-se os parâmetros apresentados no item anterior para fazer simulações numéricas de estabilidade de taludes em duas seções típicas hipotéticas de uma barragem homogênea com diferentes inclinações dos taludes, comparando a seção projetado com os parâmetros convencionais próximas da umidade ótima e projetado com as propriedades do material compactado no ramo super úmido.

As análises de estabilidade dos taludes foram feitas no software SLOPE/W, adicionalmente foi utilizado o software SEEP/W para estabelecimento das redes de fluxo nas diferentes etapas analisadas, fase de enchimento, operação e rebaixamento rápido da barragem.

### 2.2.1 - Seções típicas usadas nas análises

Foram utilizadas duas seções com diferentes inclinações dos taludes de montante e jusante de uma barragem de terra homogênea com filtro vertical que é muito usada no Brasil, pelas condições topográficas com vales muito abertos e a disponibilidade de material terroso. As seções típicas se apresentam na Figura 1. A Seção 1 tem um talude de 3:1 a montante e de 2.5:1 no talude de jusante, enquanto a Seção 2 apresenta um talude de 4:1 a montante e de 4:1 a jusante.

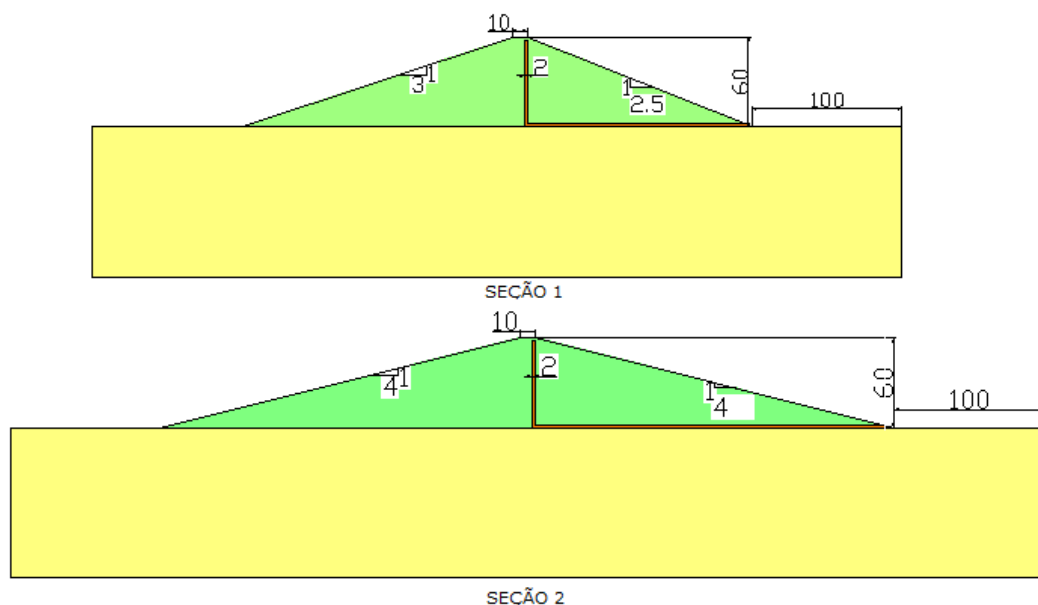


Figura 1 – Seções utilizadas nas análises

As geometrias escolhidas são geometrias típicas encontradas na literatura disponível sobre o tema, com dados comuns para projetos dentro do Brasil e países tropicais.

### 2.2.2 - Tipos de análises

As análises foram realizadas nas seguintes etapas

- Final de construção: O maciço não teve tempo de adensar, então o comportamento é não adensado e não drenado, pois o tempo de compactação é rápido, comparado com a dissipação de poropressões. (Parâmetros obtidos do ensaio triaxial UU)
- Fase de enchimento: o maciço não teve tempo de adensar, comportamento não adensado e não drenado, parâmetros a serem utilizados obtidos do ensaio UU. Esta análise não foi realizada porque não se considera a situação mais crítica.
- Operação: o maciço adensou e a rede de fluxo foi estabelecida, parâmetros a serem utilizados obtidos do ensaio CD.
- Rebaixamento rápido: O maciço adensou, mas a ruptura ocorre em condições não drenadas, parâmetros a serem utilizados obtidos do ensaio CU.

Foi utilizado o método de Morgenstern & Price (1965), este método considera uma superfície de ruptura não circular e satisfaz todas as condições de equilíbrio estático: equilíbrio de forças verticais, equilíbrio de forças horizontais e equilíbrio de momentos.

### 2.2.3 - Fatores de segurança de referência

Na literatura Brasileira encontrada sobre o assunto, apresenta-se fatores de segurança mínimos para este tipo de projetos como se mostra no Quadro 3.

Quadro 3- Fatores de segurança mínimo permitidos (Assis, 2003)

Fases de Projeto	Talude	Fator de Segurança
Final de Construção	Montante	1,3
	Jusante	1,3
Primeiro Enchimento	Montante	1,25 a 1,3
	Jusante	---
Regime de Operação	Montante	---
	Jusante	1,5
Rebaixamento Rápido	Montante	1,1 a 1,3
	Jusante	---

## 3 - RESULTADOS E ANÁLISES

A seguir são apresentadas as simulações realizadas e a análise dos resultados para as duas seções nas diferentes etapas de construção e operação.

### 3.1 - Final de construção

A primeira análise é realizada sem considerar carga hidráulica. Na Figura 2 e Figura 3. Se apresentam as superfícies de ruptura com  $FS_{\min}$  para a barragem da seção 1 e seção 2 respectivamente, compactada com material compactado na umidade ótima (23%), umidade ótima+2% (25%) e umidade ótima+5% (28%). Pode-se observar que os valores de  $FS_{\min}$  são maiores que os fatores mínimos do Quadro 3 para essa condição.

## SEÇÃO 1

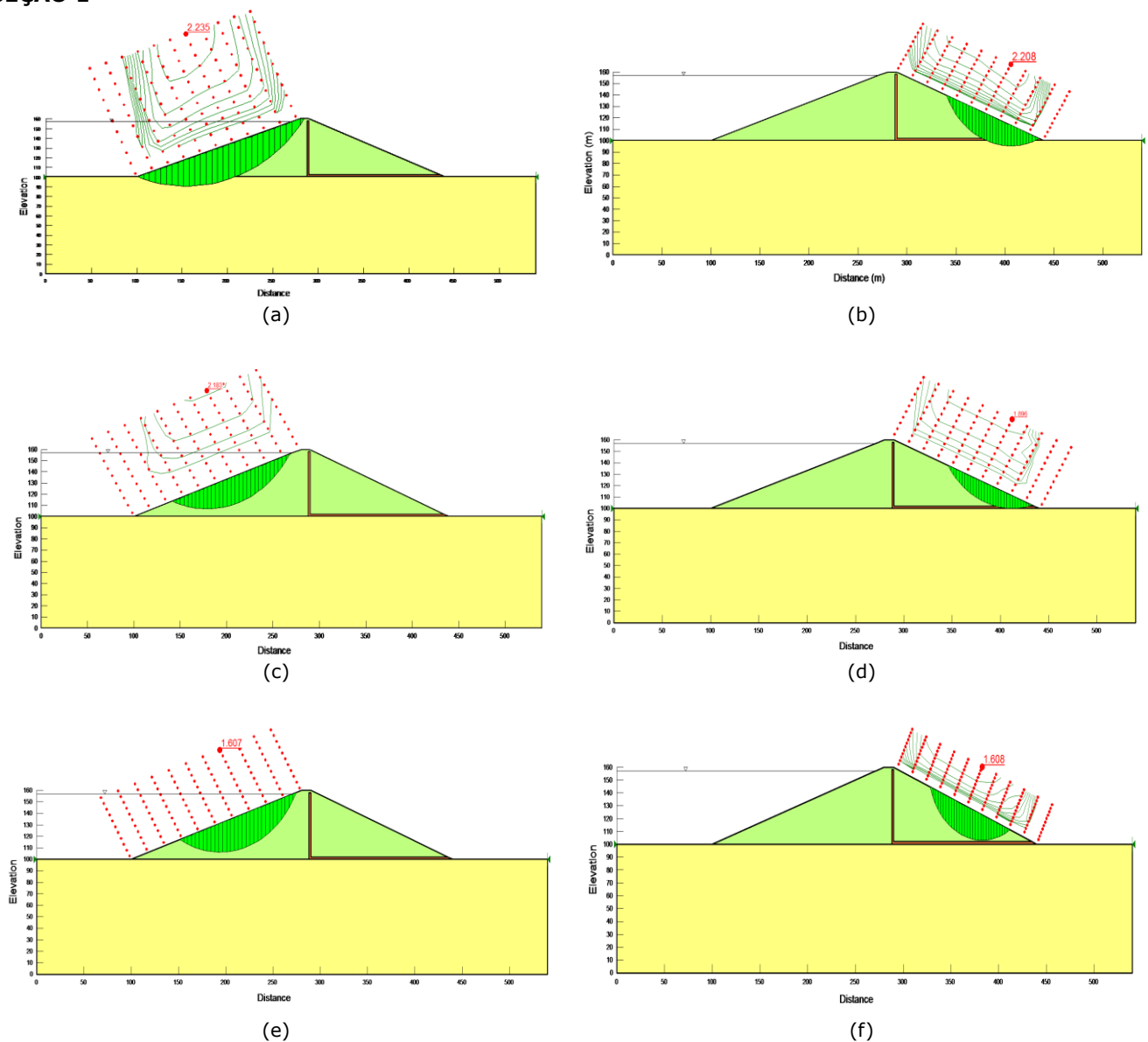


Figura 2 – Superfícies de ruptura e FSmín para a barragem homogênea da seção 1 na etapa final de construção: (a) talude de montante umidade ótima FSmín:2,235; (b) talude de jusante umidade ótima FSmín:2,208; (c) talude de montante umidade ótima +2% FSmín:2,183; (d) talude de jusante umidade ótima +2% FSmín:1,896; (e) talude de montante umidade ótima +5% FSmín:1,607; (f) talude de jusante umidade ótima +5% FSmín:1,608

Observa-se que esta etapa não é crítica nem para a seção 1 nem para seção 2 porque os valores de fator de segurança mínimos são maiores que os mínimos estabelecidos para essa etapa.

## SEÇÃO 2

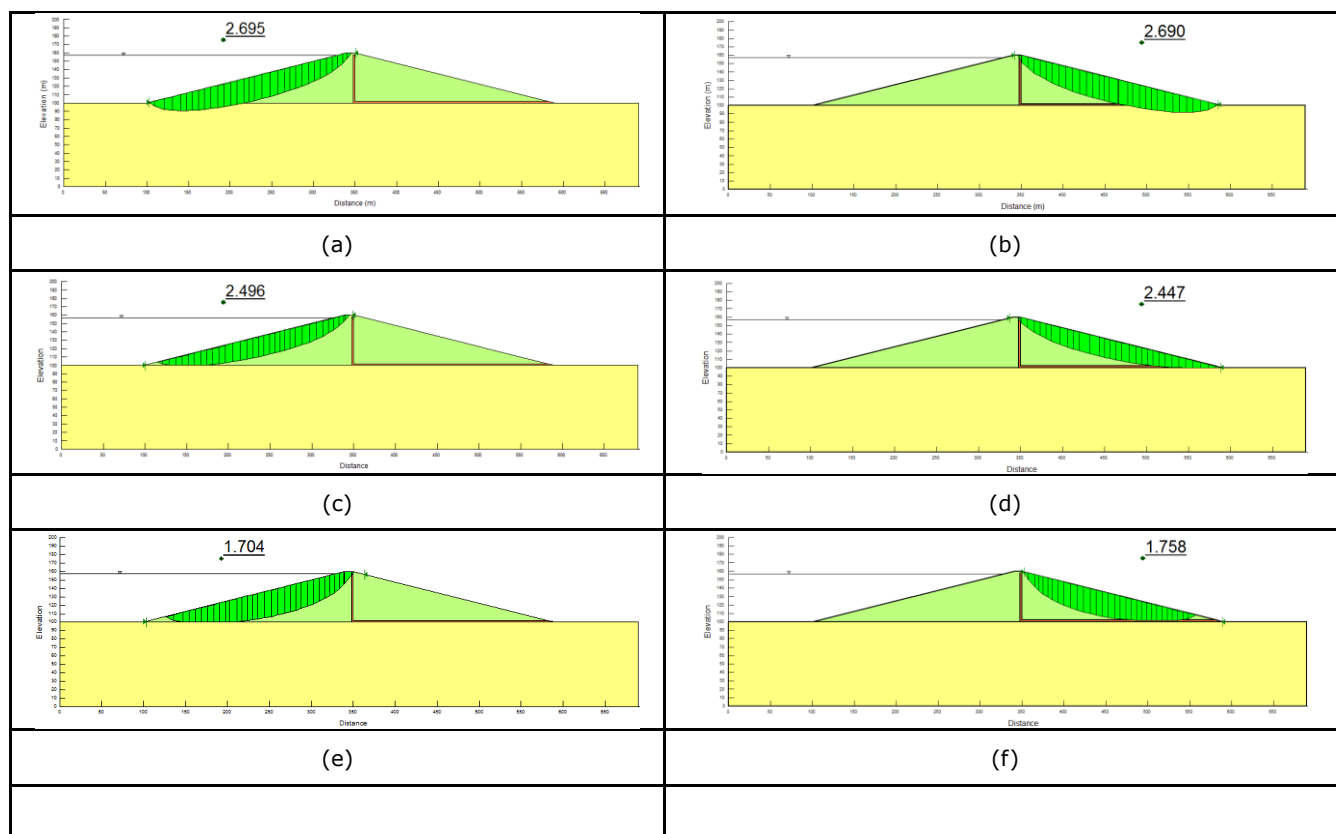


Figura 3 – Superfícies de ruptura e FSmín para a barragem homogênea da seção 2 na etapa final de construção: (a) talude de montante umidade ótima FSmín: 2,695; (b) talude de jusante umidade ótima FSmín: 2,690; (c) talude de montante umidade ótima +2% FSmín: 2,496; (d) talude de jusante umidade ótima +2% FSmín: 2,447; (e) talude de montante umidade ótima +5% FSmín: 1,704; (f) talude de jusante umidade ótima +5% FSmín: 1,758

### 3.2 - Regime permanente de operação

Nestas análises a rede de fluxo e poropressões foram criadas inicialmente no software SEEP/W e importadas para o software SLOPE/W para considerar a condição normal de operação da barragem. As análises só são realizadas para o talude de jusante, pois no talude de montante a água atua como agente estabilizador e os fatores de segurança são muito elevados. No Quadro 4 e Quadro 5 se apresentam os fatores de segurança obtidos para a seção 1 e seção 2 respectivamente.

É possível observar que na seção 1, o fator de segurança para o solo compactado com 5% acima da umidade ótima é o mais baixo e está um pouco menor que o limite apresentado no Quadro 3, o que quer dizer que não seria aceito e deve-se optar por mudar a geometria do talude ou o material de construção. Na seção 2 mesmo para a condição de compactação de umidade ótima + 5% o fator de segurança obtido foi de 1,73 que é bem superior ao valor mínimo apresentado na literatura de 1,5.

Quadro 4- Fatores de segurança do talude de jusante da seção 1 na fase de operação.

Umidade de compactação	Fator de segurança do talude de Jusante
w ótima	1,85
w ótima +2%	1,83
w ótima +5%	1,36

Quadro 5- Fatores de segurança do talude de jusante da seção 2 na fase de operação.

Umidade de compactação	Fator de segurança do talude de Jusante
w ótima	2,31
w ótima +2%	2,24
w ótima +5%	1,73

Também é possível observar que os fatores de segurança são menores que os obtidos na fase de final de construção pelo estabelecimento da rede de fluxo que satura o material e diminui a resistência ao cisalhamento do material compactado.

### 3.3 - Rebaixamento rápido

Foram realizadas análises acopladas de tensão e poropressão, usando os programas SIGMA/W e SLOPE/W, é importante salientar que a rede de fluxo e poropressões iniciais foram importadas das análises de percolação realizadas anteriormente no software SEEP/W.

Durante a etapa de rebaixamento, a carga imposta pela água é eliminada, ficando o espaldar saturado e se apresenta um excesso de poropressões que pode levar à ruptura. Geralmente é considerada a fase mais crítica pelo fato dos espaldares estarem construídos de um material muito fino.

O tempo de esvaziamento da barragem foi adotado como 15 dias para chegar até o nível 0 m. O talude de jusante não é analisado pois não é crítico nessa etapa.

Na Figura 4 são apresentados os resultados do fator de segurança mínimo para a seção 1 nas três umidades de compactação.

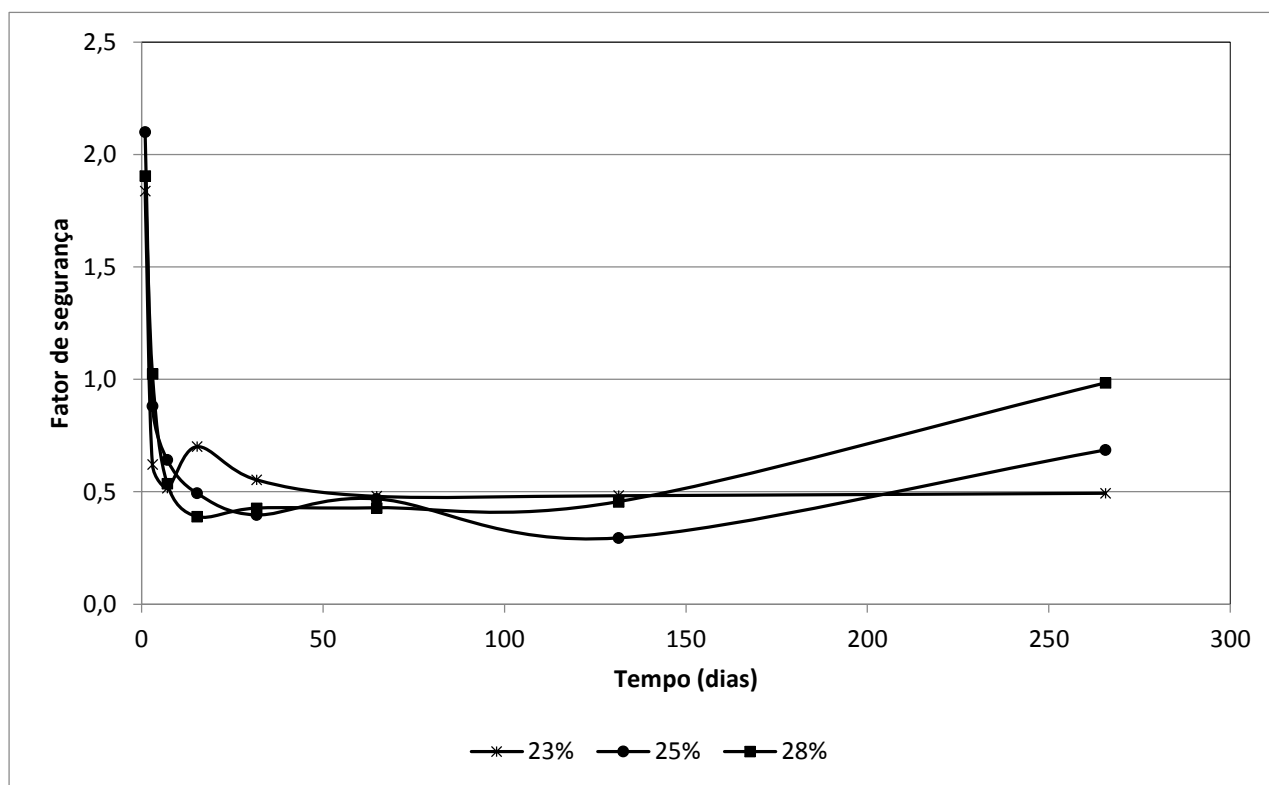


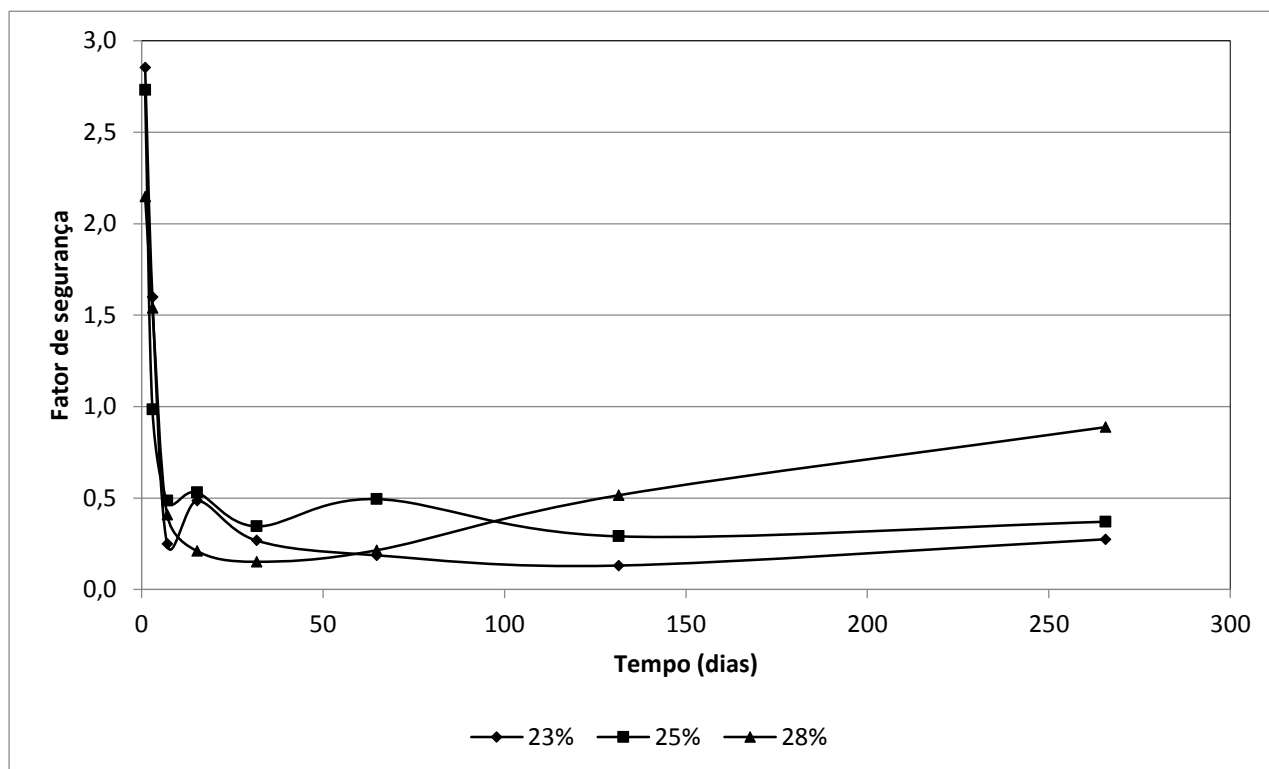
Figura 4 -  $FS_{\min}$  no rebaixamento rápido da seção 1 em função do tempo

No Quadro 3 se apresenta que o fator de segurança mínimo requerido para uma análise de rebaixamento rápido está entre 1,1 e 1,3. Nota-se que a partir do terceiro dia do rebaixamento o talude de montante apresenta fator de segurança menor que este valor e o valor mais crítico se apresenta no último dia do rebaixamento (dia 15) quando se completa o esvaziamento do reservatório. A partir desse ponto o fator de segurança começa aumentar novamente devido à lenta dissipação de poropressão pelo tipo de material que foi compactado.

Na Figura 5 se apresenta o resultado do fator de segurança mínimo da seção 2. Pode-se observar que o fator de segurança é um pouco maior, mas de qualquer forma a partir do 3 dia não atende o valor mínimo estabelecido no Quadro 3.

Nos dois casos (Seção 1 e Seção 2) o fator de segurança volta a ser maior do que 1,1 no dia 536 após ter começado o esvaziamento, o que significa que uma declividade dos taludes de montante não se vê refletido diretamente no aumento do fator de segurança para a condição mais crítica de rebaixamento rápido. O comportamento nesta fase está governado pela natureza do material compactado que por ser

predominantemente siltoso e argiloso apresentam um coeficiente de permeabilidade muito baixo e por este



mesmo motivo apresenta uma lenta dissipação do excesso de poropressão no talude de montante.

Figura 4 -  $FS_{\min}$  no rebaixamento rápido da seção 2 em função do tempo

#### 4 - CONCLUSÕES

Utilizando os resultados da campanha experimental apresentada por Buriticá (2013) e empregando o pacote de elementos finitos GeoStudio, foi possível conhecer o comportamento geral da estabilidade dos taludes de montante e jusante da barragem e determinar a influência do fator de segurança e o tipo de material inclinação dos espaldares.

Para a análise de estabilidade de taludes durante as fases de final de construção e operação do reservatório, verificou-se que tanto para a seção 1 como seção 2, o fator de segurança diminuiu sensivelmente com o aumento de teor de umidade de compactação, mas os dois casos apresentaram fatores de segurança superiores aos mínimos requeridos.

Para a fase mais crítica de rebaixamento rápido, a seção 2 (menos inclinado) apresentou valores de fator de segurança um pouco maiores que os obtidos para a seção 1, mas mesmo assim os valores de fator de segurança são muito baixos menores que os mínimos permitidos apresentados no Quadro 3, devido ao excesso de poropressão no talude de montante pela baixa permeabilidade do material silto argiloso que faz com que a dissipação das poropressões seja muito lenta.

Observou-se também que com respeito à umidade de compactação nas duas seções, o material compactado com maior teor de umidade (umidade ótima + 5%) teve um melhor comportamento de estabilidade ao longo do tempo, pois como o material é um pouco mais permeável, apresenta maior dissipação de poropressões o que gera uma recuperação mais rápida do fator de segurança.

Em termos gerais a etapa de rebaixamento rápido é muito crítica quando se trabalha com materiais muito finos com coeficientes de permeabilidade muito baixos, esta condição gera baixos fatores de segurança pela lenta dissipação das poropressões o que pode ocasionar a ruptura em períodos de esvaziamento total muito curtos.



## REFERÊNCIAS

Assis, A.P. et al. (2003). Apostila do curso de Barragens. UnB, Brasília, DF, 170p.

Buritica, J.A. (2013). Análise do comportamento de barragens construídas com núcleos argilosos compactados no ramo super úmido. Dissertação de mestrado, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 124p.

Morgenstern, N.R. e Price, V.E. (1965). The analysis of the stability of general slip surfaces, *Geotechnique*, 15, pp. 70-93.

Sanches, S., Rios, S., Viana da Fonseca, A. e Mendonça, A. (2014). Modelação numérica de um aterro sobre solos moles reforçado com colunas de DSM. *14º Congresso Nacional de Geotecnia*, Covilhã (CD\_ROM)